工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术现状与发展建议

吕清刚* 李诗媛 黄粲然
中国科学院工程热物理研究所 北京 100190

摘要 我国以煤炭为主的能源资源禀赋决定了煤炭的基础能源地位，因此如何实现煤炭清洁高效燃烧利用，成为科学家、产业界和社会关注的焦点。煤炭燃烧释放热能满足了我国约65%的发电生产需求，也为钢铁、建材、化工等工业领域提供热能，但同时也释放氮氧化物、二氧化硫、粉尘等有害污染物，造成对大气环境的影响。因此实现占煤炭燃烧总量90%的工业领域煤炭清洁高效燃烧利用，是当前我国打赢污染防治攻坚战和蓝天保卫战的“卡脖子”问题，工业领域煤炭高效清洁燃烧利用技术亟待根本性革命。文章综述了我国煤炭清洁高效燃烧利用技术现状，提出了只有发展在燃烧过程中大幅度抑制氮氧化物（雾霾的“元凶”）生成的变革性技术，再结合尾部烟气净化技术的应用，才能经济地实现常规燃煤污染物的超低排放甚至近零排放，达到甚至低于天然气排放水平，从而为工业领域煤炭高效清洁燃烧利用提供技术支撑。

关键词 工业领域，煤炭，燃烧，清洁高效

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.003

我国煤炭的基础能源地位将维持相当长时间，据预测，2030年前我国能源消费需求仍将持续稳定增长，其中年煤炭消费量仍将保持在35亿吨，占能源消费总量的50%左右。尽管煤炭消费占一次能源消费总量比重从2011年的70.2%下降为2017年的60.4%[1]，但是煤炭燃烧利用占煤炭消费量比重仍超过80%。2017年我国煤炭消费总量为38.28亿吨，其中燃煤发电用煤占比52%，钢铁、建材、化工占比37%。目前，我国发电领域70%的燃煤发电机组已经实现超低排放，达到了天然气燃烧排放水平；除发电领域外的工业领域依然呈现燃烧利用水平不高、排放污染严重、技术装备落后的状态，污染物排放贡献度超过70%。当前工业领域煤炭清洁高效燃烧利用的科技支撑不足，基础研究相对薄弱，关键核心技术支持不

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21040000）
修改稿收到日期：2019年4月1日

够，对颠覆性变革技术创新关注不足，采用发电领域的尾部为主的烟气净化系统，成本昂贵而无法应用。近年来，雾霾已经成为我国“民生之痛”，并被作为自然灾情进行预告和防治。工业领域煤炭利用的粗犷方式使其成为造成雾霾的“元凶”之一。因此，工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术发展尤为重要：提高燃烧利用水平，实现超低排放，是彻底解决煤炭作为清洁能源利用的关键和目标；创新驱动将是煤炭清洁高效利用的重要保障，也是我们打赢污染防治攻坚战和蓝天保卫战的重要支撑。工业领域煤炭高效清洁燃烧利用技术亟待根本性革命。

1 煤炭清洁高效燃烧利用技术国内外现状

1.1 发电领域国内外发展现状与趋势

煤炭燃烧利用在国际上主要用于集中发电，在发达国家发电用煤占比超过 80%。近年来，主要燃煤发电国家都在为实现发电净效率大于 50% 的目标努力，研发多能互补发电技术、智能发电技术，以实现燃煤发电的安全高效和灵活智能。大型燃煤发电锅炉在气体污染物控制方面大多数采用脱硫、脱硝和其他多种污染物联合控制技术，已广泛商业化应用，其中日本及欧美发达国家和地区处于先进行列。燃煤锅炉最初分别对颗粒物、二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_x）进行控制，形成了丰富多样的单一污染物控制技术，满足了不同机组的环保要求。随着对污染物协同控制机理的认识，对燃煤烟气中 2 种及以上污染物进行联合控制，降低烟气净化成本，实现锅炉在全负荷范围内的污染物高效脱除，已经成为燃煤污染物控制技术发展的重要趋势，并成为研究热点和难点。

我国已投入运行的大型超临界参数的燃煤发电机组超过 430 台，能效指标、污染物排放指标均进入世界先进行列，锅炉实现了高效燃烧，热效率一般大于 91%。我国燃煤电厂大多数的污染物控制技术和装备已实现国产化；我国燃煤机组大气污染物排放执行世界上最严格的标准。截至2018 年底，燃煤电站实现超低排放改造占比达到 70%，处于世界领先水平[2]。

1.2 燃煤工业锅炉国内外发展现状与趋势

除电力领域外，工业领域煤炭燃烧利用形式主要为中、小型燃煤工业锅炉供热。燃煤工业锅炉目前在欧洲等发达国家和地区仍有应用，其中大多数为链条锅炉和煤粉锅炉，其燃料质量控制、燃烧技术及自动控制均已达到很高水平。德国是世界上工业煤粉锅炉技术水平最高的国家，其工业煤粉锅炉能够实现全密闭煤粉制备与配送、煤粉精确供料、煤粉浓相燃烧、全自动化无人值守等。国外燃煤工业锅炉由于数量少，燃用高品质煤炭，且燃料特性稳定，故锅炉热效率较高，但对污染物排放要求并不严格。例如，欧盟国家燃煤工业锅炉 NO_x 排放标准为低于 200 mg/Nm^3 [3]。在工业炉窑方面，世界技术领先的有法国的 Stein和德国的 LOI 等，炉窑热效率高、超低排放、智能运行，且多种煤质燃烧适应性技术先进。

我国在役燃煤工业锅炉近 50 万台，约占全国煤炭消费总量的 20%。工业锅炉排放的烟尘、SO_2、NO_x分别占全国排放总量的 40%、26%、12% 左右[4]。工业锅炉能源消耗和污染排放均位居全国第二，仅次于电站锅炉，煤炭消耗量远高于钢铁、石化、建材等高耗能工业行业。

我国燃煤工业锅炉主要以链条炉技术为主，近年来循环流化床锅炉技术也得到了很好的应用，总体上技术发展趋势是以大容量化为主，并形成 35 t/h、65 t/h、75 t/h、130 t/h、240 t/h 的蒸汽锅炉系列[5]。“十一五”期间，我国开发出了煤粉工业锅炉，并逐步在市场上得到推广。

我国在一段时期容量为 10 t/h 及以下燃煤工业锅炉数量占总量的 80% 左右[6]，这类小锅炉基本上是层燃锅炉，锅炉效率低、污染严重。2013 年我国在《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37 号）文中明确提出全面整治燃煤小锅炉等多项举措，并规定了到

2017 年，除必要保留的以外，地级及以上城市建成区基本淘汰 10 t/h 及以下的燃煤锅炉，禁止生产和新建 20 t/h 以下的燃煤锅炉。因此，大量被淘汰的小型层燃锅炉逐渐被大容量的煤粉工业锅炉和循环流化床锅炉取代。不过，我国煤粉工业锅炉的 NO_x 排放浓度偏高，其技术成熟度还有待提高。随着国家环保要求的日益严苛，给燃煤工业锅炉排放提出了更高的要求，然而燃煤工业锅炉存在燃烧技术落后、燃料适用性差、污染物排放高、控制及管理水平落后等问题。目前我国燃煤链条工业锅炉热效率平均约 70%—80%，循环流化床和煤粉工业锅炉热效率接近达到 90%。NO_x 原始排放平均水平在 200—400 mg/Nm^3 左右，须通过选择性非催化还原（SNCR）技术、选择性催化还原（SCR）技术，且辅以低氮燃烧才能实现超低排放（50 mg/Nm^3），脱硫脱硝费用远高于锅炉成本，致使锅炉烟气净化实施困难。

1.3 燃煤工业炉窑国内外发展现状与趋势

国外在燃煤工业炉窑的清洁燃料制备、高效燃烧及炉型结构、低 NO_x 燃烧技术和燃烧烟气的深度治理方面进行了大量研究，成果显著。以耗煤量最大的冶金及建材行业为例，英国、美国、德国等都对喷吹粉煤技术进行了研究和应用，通过喷吹粉煤技术有效降低了焦煤比，实现了煤炭的高效利用。

我国引进和发展了高炉喷煤技术、富氧/全氧冶金技术、水泥窑分级燃烧等技术，提升了工业炉窑的煤炭利用水平。但我国燃煤工业炉窑的平均热效率仍比国外先进水平低 15% 左右，污染排放则更高。2015 年统计表明，我国工业炉窑年煤耗量占全国煤炭消耗总量的 8%，NO_x 年排放量占全国燃煤 NO_x 排放总量的 19%[7]，其中以水泥、钢铁两大行业的炉窑所占比例最大。以我国水泥炉窑污染物排放标准中 NO_x 为例，重点地区排放控制水平不高于 320 mg/Nm^3，一般地区不高于 400 mg/Nm^3，江苏、河南等一些地方省、市、地区甚至提出不高于 100 mg/Nm^3 的排放标准。目前我国水泥炉窑主要采用常规低氮燃烧器和分级燃烧技术，尾部分解炉采用 SNCR 脱硝技术，脱硝效率只能达到 50%，NO_x 减排效果不太理想，NO_x 排放基本在 300—400 mg/Nm^3，但喷入脱硝用的氨水所带来的氨逃逸问题没有很好地解决（河南省已将氨逃逸排放浓度列入排放指标，规定在 10% 基准氧含量条件下氨逃逸排放浓度不能高于 8 mg/Nm^3）；而 SCR 技术虽然 NO_x 减排效果较好（脱硝效率可达到 90%），但是投资、运行和维护成本较高，很难在水泥行业推广应用。从日益严苛的排放标准来看，水泥炉窑的污染物减排形势非常严峻。

2 我国工业领域煤炭燃烧技术的产业需求

2.1 量大、面广、需求强劲的局面将持续

我国是世界上拥有燃煤工业锅炉最多的国家，这也是我国煤炭为主的能源资源禀赋和经济发展水平决定的。工业锅炉市场需求主要为北方地区供暖和工业生产提供蒸汽。截至 2016 年底，我国北方地区城乡建筑取暖总面积约 206 亿平方米，燃煤取暖面积约占总取暖面积的 83%；取暖用煤年消耗约 4 亿吨标煤，其中散烧煤（含低效小锅炉用煤）约 2 亿吨标煤，主要分布在农村地区。清洁燃煤集中供暖（工业锅炉热电联产）面积仅约 35 亿平方米[8]。此外，燃煤工业锅炉约 50% 以上用于为工业生产提供蒸汽。据统计，在我国工业生产中轻纺工业、能源工业、建材业、建筑业、化学工业、冶金工业和交通运输业等行业均是工业锅炉的主要市场。工业锅炉需求的容量等级蒸汽量从 20 t/h 到 480 t/h、热水锅炉从 14 MW 到 116 MW 已形成系列产品等级。总体呈现量大、面广、需求强劲的局面。

我国以煤炭为燃料的工业炉窑种类较多。以耗煤量较大的水泥工业为例，2018 年我国全年水泥产量达 21.8 亿吨，虽然较 2017 年减少 1.4 亿吨，但绝对体量仍然较大。根据水泥大数据研究院最新

预计，2019年我国水泥产量仍将维持在21亿吨左右。截至2018年，我国现有新型干法水泥生产线近1 700条，且均以煤炭为主要燃料，按照最新预计的水泥产能计算，年耗标煤2亿吨左右。如果这些生产线均实现煤炭清洁高效燃烧利用，达到超低排放水平，水泥行业对于煤炭燃烧技术的技术升级和装备升级需求巨大。类似于水泥行业，在钢铁、化工等行业也同样对煤炭燃烧技术升级有较强的需求。

2.2 国家政策助力煤炭清洁高效燃烧技术及装备升级换代

2014年，国家发展改革委、环保部、财政部、质检总局、工信部、国管局、国家能源局等七部门联合发布的《燃煤锅炉节能环保综合提升工程实施方案（发改环资〔2014〕2451号）》指出我国出现的大范围、长时间严重雾霾天气，与燃煤工业锅炉区域高强度、低空排放的特点密切相关，对地级及以上城市建成区禁止新建20 t/h以下的燃煤锅炉，并加大对锅炉节能环保基础性、前沿性和共性关键技术的研发力度。2015年，工信部和财政部联合编制了《工业领域煤炭清洁高效利用行动计划（2015—2020年）》，明确指出在工业锅炉等重点用煤领域加强对能耗高、污染重的工艺装备技术改造，从源头减少煤炭消耗及污染物的产生。2015年，工信部印发《2015年工业绿色发展专项行动实施方案》，对工业领域煤炭清洁化利用做出布局，实施燃煤锅炉节能环保综合提升工程。2016年7月，工信部印发《高效节能环保工业锅炉产业化实施方案》提出，到2020年底，攻克一批高效节能环保工业锅炉关键共性技术，培育一批高效节能环

表1　各国及地区工业锅炉排放标准对照

国家/地区	颗粒物（mg/m^3）	二氧化硫（mg/m^3）	氮氧化物（mg/m^3）
中国	30—80	200—550	200—400
北京	5（新建） 10（现有）	10（新建） 20（现有）	30（新建） 80（现有）
上海	10（2020-10-01后） 20（2020-09-30前）	20（2020-10-01后） 20（2020-09-30前）	50（2020-10-01后） 150（2020-09-30前）
天津	5（新建） 10（现有）	10（新建） 35（现有）	30（新建） 50（现有）
山东	5（新建） 20（现有）	35（新建） 200（现有）	50（新建） 300（现有）
河北	20（煤粉锅炉） 30（其他锅炉）	50（煤粉锅炉） 300（其他锅炉）	100（煤粉锅炉） 300（其他锅炉）
河南	10	35	100（循环流化床锅炉） 50（其他锅炉）
广东	30	200	200
浙江	10	35	50
重庆	30（新建） 30（现有）	50（新建） 200（现有）	200（新建） 200（现有）
德国			200
美国	12.3	136	95
欧盟	10	150	200

保工业锅炉制造基地，高效节能环保工业锅炉市场占有率达 60% 以上。2018 年 7 月，国务院公布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，明确了大气污染物防治的总体思路、基本要求、主要目标和保障措施，提出了打赢蓝天保卫战的时间表和路线图。

随着大气污染的日益凸显，国家政策总体上出现了重点地区“限煤”倾向。因此，从产业发展来看，目前靠投资和产能扩张推动行业发展增长的方式将遇到瓶颈，工业领域必须以变革性和颠覆性的煤炭清洁高效燃烧技术及装备的创新，来推动产业的升级和新的增长点。

2.3 日益严格的环保标准迫使煤炭清洁高效燃烧技术及装备升级换代

在工业领域，燃煤工业锅炉的大气污染物排放标准逐步提高。2014 年 7 月 1 日实施的《锅炉大气污染物排放标准》，规定了新建燃煤锅炉大气污染物颗粒物、SO_2、NO_x 排放标准分别为 30 mg/m^3、200 mg/m^3、200 mg/m^3。近年来，各地区在国家标准的基础上逐步将工业锅炉的排放标准向燃煤电站锅炉排放标准看齐，要求超低排放。表 1 给出了我国主要省份和城市工业锅炉排放标准及标准修订讨论稿，以及与世界发达国家相应标准的对照。可以看出，我国将执行世界上最严格的工业锅炉排放标准，这将会给技术和产业升级换代提供巨大机会。

包括我国在内的很多国家都对水泥工业的 NO_x 排放水平制定了较为严苛的标准（表 2）。我国《水泥工业大气污染物排放标准》（GB4915-2013）中规定，重点地区 NO_x 排放控制水平不高于 320 mg/Nm^3，一般地区不高于 400 mg/Nm^3。同时，一些地方省市地区甚至提出了更严格的排放标准。例如：江苏省规定水泥工业 2019 年 6 月1日前 NO_x 排放不能高于 100 mg/Nm^3；河南省在 2019 年初，对全省范围的水泥熟料生产企业进行提标治理，规定在基准氧含量 10% 条件下，水泥炉窑的 NO_x 排放浓度不得高于 100 mg/Nm^3；山东省规定水泥工业 NO_x 排放不能高于 300 mg/Nm^3。出台的一系列严格标准给水泥行业煤炭清洁高效燃烧技术及污染

表 2　各国及地区工业炉窑排放标准对照

	国家/地区	颗粒物（mg/m^3）	二氧化硫（mg/m^3）	氮氧化物（mg/m^3）
水泥炉窑	中国（GB4915-2013）	20（重点地区） 40（一般地区）	100（重点地区） 200（一般地区）	320（重点地区） 400（一般地区）
	河南	10	35	100
	江苏	20	100	100
	山东	20	100	300
	欧盟	10—20	50—400	200—450
	美国	4（新建） 14（现有）	80	300
	日本	50（特殊地区） 100（一般地区）	实行K值控制	500（大型） 700（小型）
钢铁炉窑	中国	20（新建） 50（现有） 15（污染严重地区）	100	300
	山东	20（新建） 20（现有） 15（污染严重地区）	80（新建） 100（现有） 80（污染严重地区）	300

物控制技术提出了更高的要求，同时也为产业升级提供了空间。

2.4 高效清洁燃烧先导项目部署助力工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术发展

中国科学院针对我国能源发展对技术的战略需求，部署了A类战略性先导科技专项“变革性洁净能源关键技术与示范”。“高效清洁燃烧关键技术与示范”是其中一个关键项目，其核心目标是针对工业领域高效清洁燃烧利用，以降低散煤燃烧 NO_x 排放、减少雾霾为导向，实现 NO_x 排放降低40%，为工业及民用散煤高效燃烧与 NO_x 减排提供技术方案和应用实例。最核心的任务是研究开发在燃烧过程中实现 NO_x 超低排放的燃烧技术，实现燃烧技术的变革。选定最为迫切、污染严重、量大面广、难度最大、比较分散的工业锅炉和工业窑炉为技术研发和应用对象。

3 我国工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术面临的挑战与发展建议

我国燃煤发电领域中的燃煤锅炉具有容量大、集中度高的特点，很快实现了超低排放，即达到天然气燃烧排放水平，正在向近零排放水平努力；工业锅炉和工业窑炉具有应用分散、规模小的特点，直接采用发电锅炉的燃煤污染物控制技术并不经济，也不适应，需要重新开发，挑战性巨大。

3.1 煤炭清洁高效燃烧利用技术面临的挑战

我国以煤炭为主的能源资源禀赋和经济发展水平，决定了煤炭燃烧利用是不可不用的。2017年我国在北方地区还是以燃煤采暖为主，这种状况还会持续多年。近些年我国大力发展其他清洁能源，如风能、太阳能、核能等；我国风能、太阳能发电量也居世界前列。但是，这些能源发电成本远高于火力发电成本，体量太小，并且需要大规模财政补贴。如果北方大面积实行“煤改气”“煤改电”，各级地方政府无疑会负担沉重。而如果没有财政补贴，目前清洁能源是很难有竞争力的。我国工业企业技术水平还不高，低成本仍然是我国工业的主要优势；一旦天然气、电力成本上升，我国工业企业是难以承受的，实体经济将会受到更大的打击。

我国能源安全是建立在煤炭基础之上的，因此在工业领域如何高效清洁地利用煤炭是目前我国“卡脖子”的关键领域，而工业煤炭的清洁高效燃烧技术是突破“卡脖子”的关键技术。近年来虽然高效、环保、节能的燃煤工业锅炉得到了快速发展，工业炉窑的综合能耗和排放也有了很大的进步，但仍存在以下核心关键技术的挑战：

（1）燃煤工业锅炉总体技术水平落后，单机容量小，锅炉能耗高，热效率低，自动化程度低；

（2）中小型锅炉需求数量多，不集中，污染物排放控制技术水平低，污染物排放严重；

（3）燃煤工业锅炉烟气净化设备投资和后期的运行费用高。达到超低排放标准，尾气净化工艺无法完全借鉴燃煤电站锅炉；

（4）工业炉窑煤炭燃烧技术落后，能耗高，实现超低排放困难。

3.2 煤炭清洁高效燃烧利用技术发展的建议

面对以上挑战和困难，我们需要在煤炭清洁高效燃烧的核心关键技术和燃烧装备方面加大投入。从我国的基本国情出发，开发适合中国的工业领域煤炭清洁高效燃烧技术，真正解决我国由于工业用煤造成的二次污染问题，实现污染物排放达到燃烧天然气的水平；同时，将煤炭作为清洁能源实现高效利用。基于此，针对煤炭清洁高效燃烧技术的发展提出4个方面的建议。

（1）开发燃煤工业锅炉升级换代技术。以提高锅炉能效为前提，污染物减排为目标，重点开发炉内高效清洁燃烧技术的升级换代技术，彻底淘汰落后的层燃锅炉技术。短期内，针对大量分散的在用小型工业燃煤设

备的优化、改造和升级是非常必要的。提高工业锅炉容量和蒸汽参数，重点研发单台容量75—220 t/h等级的循环流化床工业蒸汽锅炉以及相当容量的热水锅炉，进一步提高循环流化床工业锅炉的节能环保性能，提高锅炉制造及运行的可靠性和稳定性；开发清洁高效煤粉燃烧技术，以大容量高参数煤粉锅炉代替淘汰的层燃锅炉，提高燃煤工业锅炉效率，并且集中进行烟气净化处理；优化锅炉岛辅机设备的配置，降低系统能耗，提高整体能效。

（2）研发先进的工业锅炉燃烧技术及燃烧器。针对煤种适应性和超低排放的要求，研发适用于工业锅炉的新型燃烧技术及燃烧器，通过理论和技术的原始创新，获得高效燃烧耦合超低氮排放的综合效果。重点研发不同煤种单台容量35—220 t/h等级的新型工业锅炉，性能指标和排放指标均优于已有工业锅炉炉型，燃烧原始NO_x排放直接达到超低排放水平，无须进行烟气脱硝处理。重点研发低挥发分煤，如无烟煤以及煤炭转化过程中的飞灰残炭等超低挥发分燃料，高效清洁燃烧的工业锅炉技术，突破已有工业锅炉无法清洁高效燃烧此类燃料的技术瓶颈，拓宽工业锅炉燃料的适应性，使工业锅炉可以因地制宜地选择燃料，从而降低使用成本。

（3）探索适用于燃煤工业锅炉的烟气净化工艺及最优系统。从工业锅炉容量和煤质出发，通过与电站锅炉烟气净化工艺的对比研究和应用实践，系统分析烟气净化工艺的技术经济性，获得最优的燃煤工业锅炉烟气净化工艺。评估循环流化床锅炉炉内脱硫、半干法脱硫、湿法脱硫和脱硫脱硝一体化工艺的适用范围，以及与炉内低氮燃烧和烟气脱硝的耦合匹配。重点开发煤粉工业锅炉脱硫、脱硝和除尘的优选工艺。开发低成本的烟气净化一体化工艺和设备，进一步降低燃煤工业锅炉烟气净化的成本。

（4）全面提升工业炉窑的煤炭燃烧技术及污染物控制水平。针对燃煤高耗能、高污染的工业炉窑，如水泥炉窑等，开发先进的低氮燃烧技术，改造和提升现有水泥炉窑的NO_x控制水平。进一步开发工业炉窑煤炭燃烧利用的升级换代技术和装备，改变目前盲目采用SNCR和SCR脱硝技术的粗犷模式，从根本上避免氨逃逸等二次污染问题。结合我国实际工业炉窑的节能特点，开发新型工业炉窑，结合成熟的互联网技术和工业自动化技术，提高在线监测、无人值守等自动化程度，全面提升我国工业炉窑的煤炭清洁高效燃烧技术和污染物控制水平。

（5）发展煤炭燃烧的变革性技术，经济地实现NO_x超低排放或近零排放水平。开发煤炭高效清洁燃烧的变革性技术，仅通过煤炭燃烧过程，无需烟气脱硝设备，就可以实现NO_x超低排放，这将大幅降低燃煤工业锅炉的投资和运行成本，使燃煤工业锅炉实现超低排放成为可能。以循环流化床工业锅炉燃烧技术为例，通过新型分级燃烧及后燃技术直接实现NO_x超低排放。以煤粉工业锅炉燃烧技术为例，研发煤粉预热NO_x超低排放燃烧技术，以期实现燃煤工业锅炉达到超低排放的目标。实现经济性好和不受规模限制的高效燃煤的近零排放技术突破，让煤炭成为清洁能源，而不再是大气污染的主要因素，是我国工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术研发和应用的终极目标。这项技术完全可以应用到燃煤电站锅炉，使得排放控制成本大幅度降低。

4 结语

开发并应用工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术是打赢污染防治攻坚战和蓝天保卫战的重中之重。我国燃煤发电领域中的燃煤锅炉具有容量大、集中度高的特点，很快实现超低排放，即达到天然气燃烧排放水平，正在向近零排放水平努力；但是由于成本高，还存在二次污染，需要在燃烧过程大幅度降低NO_x的生成，才能经济地实现常规燃煤污染物的超低排放甚至近零排放。燃煤工业锅炉和炉窑量大、面广、规模

小，主要靠燃烧过程的氮氧化物控制的燃烧技术，辅以尾部净化技术实现超低排放。因此，开发具有变革性的燃烧技术，即在燃烧过程中直接控制 NO_x 生成的高效超低排放燃烧技术，突出经济性好和不受规模限制特点，实现高效燃煤的近零排放技术突破，让煤炭成为清洁能源，而不再是大气污染的主要因素，以适应我国高速的经济发展和生态环境建设，这也是我国工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术研发和应用的终极目标。

参考文献

1 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2017. 北京: 中国统计出版社, 2017.

2 贾常艳. 向更高质量、更有效率、更加公平、更可持续发展. 电器工业, 2018, 19(3): 1.

3 邓伟妮. 中欧火电厂烟气排放规定对比研究. 中国电力, 2015, 48(3): 156-160.

4 张敏敏, 李国强, 曲立晟, 等. 石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺在工程的应用. 环境与生活, 2014, 8(18): 182.

5 赵钦新. 我国工业锅炉发展回顾与“十二五”展望. 工业锅炉, 2011, 27(6): 1-8.

6 何心良. 我国工业锅炉使用现状与节能减排对策探讨. 工业锅炉, 2010, 26(3): 1-8.

7 董广霞, 吕卓, 程洁, 等. 我国重点调查企业工业锅炉污染排放特征. 中国环境监测, 2018, 34(1): 41-46.

8 冯陈玥, 段兆芳, 孙文宇. 推进北方地区清洁取暖对天然气市场的影响. 中国能源, 2018, 40(6): 28-30, 37.

Current Situation and Development Suggestions of Coal Clean and Efficient Combustion Technology in Industry Field

LYU Qinggang* LI Shiyuan HUANG Canran

(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In China, coal is the main energy resource, which makes it to be the basic energy. It has always been the focus for the scientists, industry, and society that how to realize the coal clean and efficient combustion. The coal-fired power generation accounts for 65% of total amount of electricity, and coal combustion can also provide heat for the fields of iron and steel, building materials and chemical industry. Meanwhile, the harmful pollutants of released nitrogen, sulfur, dust, and others will greatly affect air environment. Therefore, realizing coal clean and efficient combustion in industry field taking 90% amount of total coal combustion plays a critical role in winning the battles of pollution control and blue sky protection, and it is urgent to update the coal clean and efficient combustion technology in industry field fundamentally. In this paper, the current situation of coal clean and efficient combustion technology is reviewed, and it is proposed that the transformational technology greatly inhibiting nitrogen oxides (the main component of haze) in combustion process and combining flue gas cleaning technology can realize ultra-low emission or even near zero emission of pollutants in normal coal combustion economically, which can provide technological support for coal clean and efficient combustion in industry field.

Keywords industry filed, coal, combustion, clean and efficient

*Corresponding author



吕清刚　中国科学院工程热物理研究所副所长、研究员、博士生导师，中国科学院特聘研究员。先后任国家“863”计划“洁净煤主题专家组”成员、国家重点研发计划“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”专项总体专家组成员、科技创新2030-重大项目“煤炭清洁高效利用”实施方案专家组成员。正在主持中国科学院战略性先导科技专项（A类）“变革性洁净能源关键技术与示范”中的“高效清洁燃烧关键技术与示范”（XDA21040000）项目。主要从事煤炭的清洁高效燃烧，循环流化床燃烧与气化技术及产业化应用等相关研究。在国内外期刊上发表论文110余篇，申请发明专利140余件。E-mail: qglu@iet.cn

LYU Qinggang　Professor, deputy director of the Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is a doctoral supervisor. He is now the project leader of Key Technology and Demonstration of Clean and Efficient Combustion, belong to the Strategic Priority Research Program of CAS on Transformational Technologies for Clean Energy and Demonstration. He is currently engaged in technologies concerning clean coal combustion, circulating fluidized bed combustion and gasification, and their applications. He has published more than 110 papers and has applied more than 140 patents. E-mail: qglu@iet.cn

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2017. 北京: 中国统计出版社, 2017.

National Bureau of Statistics of the PRC. China Statistical Yearbook-2017. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)

2 贾常艳. 向更高质量、更有效率、更加公平、更可持续发展. 电器工业, 2018, (3): 1.

Jia C Y. Towards higher quality, more efficient, fairer and more sustainable development. China Electrical Equipment Industry, 2018, (3): 1. (in Chinese)

3 邓伟妮.中欧火电厂烟气排放规定对比研究. 中国电力, 2015, 48(3): 156-160.

Deng W N. Comparative study on flue gas emission rules of thermal power plants in EU and China. Electric Power, 2015, 48(3): 156-160. (in Chinese)

4 张敏敏, 李国强, 曲立晟, 等. 石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺在工程的应用. 环境与生活, 2014, (18): 182.

Zhang M M, Li G Q, Qu L S, et al. Application of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization process in engineering. Green Living, 2014, (18): 182. (in Chinese)

5 赵钦新. 我国工业锅炉发展回顾与“十二五”展望. 工业锅炉, 2011, (6): 1-8.

Zhao Q X. Reviews and prospects in China’s industrial boiler development. Industrial Boiler, 2011, (6): 1-8. (in Chinese)

6 何心良. 我国工业锅炉使用现状与节能减排对策探讨. 工业锅炉, 2010, (3): 1-8.

He X L. The present situations of IB in use and strategy of energy-conservation and emission-reduction in China. Industrial Boilers, 2010, (3): 1-8. (in Chinese)

7 董广霞, 吕卓, 程洁, 等. 我国重点调查企业工业锅炉污染排放特征. 中国环境监测, 2018, 34(1): 41-46.

Dong G X, Lyu Z, Cheng J, et al. Industrial boiler pollution status in major-survey industrial enterprises and its countermeasures in China. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(1): 41-46. (in Chinese)

8 冯陈玥, 段兆芳, 孙文宇. 推进北方地区清洁取暖对天然气市场的影响. 中国能源, 2018, 40(6): 25-27.

Feng C Y, Duan Z F, Sun W Y. Influence of promoting the clean heating in the northern region on the natural gas market. Energy of China, 2018, 40(6): 25-27. (in Chinese)